Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 23, No. 2, Summer 2025, p. 227-240

The Effect of Foliar Applications of Fe and Salicylic Acid on Sesame (*Sesamum indicum* L.). under Water Deficit Conditions

M. B. Amiri[1,2*], M. Sepehri Bimorghi[3], A. Mirzaeian[2]

1- Department of Plant Production, Faculty of Agriculture, University of Gonabad, Gonabad, Iran
2- Department of Agrotechnology, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
3- Medicinal Plants and Drugs Research Institute, Beheshti University of Tehran, Tehran, Iran
(*- Corresponding author's Email: amiri@gonabad.ac.ir, mb.amiri@um.ac.ir)

Received: 28 January 2024 Revised: 27 February 2025 Accepted: 11 March 2025 Available Online: 12 April 2025	**How to cite this article:** Amiri, M. B., Sepehri Bimorghi, M., & Mirzaeian, A. (2025). The effect of foliar applications of fe and salicylic acid on sesame (*Sesamum indicum* L.). under water deficit conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research, 23*(2), 227-240. (In Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.86586.1304

Introduction

Sesame, with the scientific name *Sesamum indicum* L., is a member of the Pedaliaceae family. It is one of the oldest and most popular oilseeds known in the world and has the highest oil and seed protein content among oilseed plants. This plant is typically cultivated as a drought-resistant plant in arid and semi-arid regions, however, there have been reports of a significant effect of deficit irrigation on sesame yield and a decrease in the number of capsules per plant, number of seeds per plant, thousand-seed weight, grain yield, and biological yield under drought stress compared to full irrigation. Plants are constantly exposed to various stresses, and drought stress is the most important factor limiting crop yield in many parts of the world. Given that most of Iran's oil needs are imported and the limited water resources, the development of water-resistant oilseed crops is essential. The application of micronutrients through foliar application can improve plant growth under stress conditions. Among the micronutrients, Fe is particularly important for many metabolic activities in plants; therefore, plants require sufficient amounts of this element to continue their growth. Fe deficiency causes a significant reduction in the yield and quality of the crop. Salicylic acid is a plant regulator that is effective in increasing plant tolerance to stresses such as drought and plays a fundamental role in regulating plant physiological processes. Increased germination, induction of flowering, improved growth and development, increased yield and fruit yield, inhibition of ethylene synthesis, and effects on plant activities including stomatal opening and closing, water relations, membrane stability, nutrient absorption, and activation of disease resistance factors are some of the cases attributed to the use of salicylic acid. Given Iran's arid and semi-arid climate, and the importance of sesame as a valuable crop in tropical and subtropical regions with wide applications in the food and cosmetic industries, this study aimed to investigate the effects of foliar application of iron (Fe) and salicylic acid on the growth and yield of sesame under deficit irrigation conditions. Despite the significance of ecological approaches, limited research has addressed drought stress mitigation in sesame cultivation using such inputs.

Materials and Methods

In order to investigate the response of sesame to drought stress, and especially the effect of foliar spraying with iron and salicylic acid, an experiment was conducted as a factorial split-plot based on a randomized complete block design with three replications at the research farm of the Faculty of Agriculture, Gonabad

https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.86586.1304

University in 2020-2021. Three different irrigation levels (full irrigation, cut-off irrigation at the podding stage, and cut-off irrigation at the flowering stage) were applied to the main plots and a factorial combination of foliar spraying and non-foliar spraying of salicylic acid and Fe (iron) was applied to the subplots. At the end of the growing season, with the beginning of the seed ripening stage and the drying of the plant's aerial parts, plants of 0.1 m^{-2} from each experimental plot were randomly selected and traits such as plant height, shoot dry weight, number of pods per plant, number of seeds per pod, number of seeds per plant, seed weight per plant, and 1,000-seed weight were measured. To determine the seed yield, biological yield, and harvest index, after removing the marginal effect, plants from the entire experimental plot were harvested and their total and seed weights were determined. Data analysis of variance (ANOVA) and graphing were performed using Ver. SAS 9.4 and MS Excel Ver. 11 and comparison of treatment means was performed using Duncan's multiple range test at a probability level of 5%.

Results and Discussion

The maximum plant height was observed under the combined application of salicylic acid and Fe with full irrigation (82.6 cm), while the minimum plant height was recorded in the treatment without salicylic acid and Fe application under cut-off irrigation at the flowering stage (42.6 cm). The highest number of seeds per capsule was obtained in the treatment with combined foliar application of salicylic acid and Fe under cut-off irrigation at the podding stage (56.6), whereas the lowest value for this trait was observed in the absence of salicylic acid and Fe application under cut-off irrigation at the flowering stage (22.7 seeds per capsule). Cut-off irrigation at the podding and flowering stages led to a reduction in seed yield by 39% and 55%, respectively, compared to full irrigation. Foliar application of iron increased seed yield by 18% compared to the non-application of Fe. The treatment involving cut-off irrigation at the podding stage, combined foliar application of salicylic acid and Fe, and separate foliar application of salicylic acid and Fe increased the harvest index by 16%, 7%, and 6%, respectively, compared to the non-application of foliar treatments.

Conclusion

In general, it appears that foliar application of 1 mM salicylic acid and 5 in 1000 Fe mitigated the adverse effects of cut-off irrigation at podding and flowering stages in sesame.

Keywords: Cut of irrigation, Harvest index, Micronutrients, Organic acid, Seed yield

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۳، شماره ۲، تابستان ۱٤۰٤، ص ۲٤۰-۲۲۷

اثر محلول‌پاشی آهن و اسید سالیسیلیک بر خصوصیات رشدی و عملکرد کنجد (*Sesamum indicum* L.) در شرایط کم‌آبیاری

محمدبهزاد امیری[۱,۲]*، محمد سپهری بیمرغی[۳]، عاطفه میرزائیان[۲]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱

چکیده

یکی از اثرات تنش خشکی بر هم زدن تعادل تغذیه‌ای در گیاهان است. کاربرد عناصر غذایی مانند آهن به‌صورت محلول‌پاشی به‌دلیل تأثیر در افزایش مقاومت به تنش‌های غیرزیستی می‌تواند در کاهش خسارت ناشی از کمبود آب مؤثر باشد. اسید سالیسیلیک یکی از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی است که در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌هایی هم‌چون خشکی مؤثر است. به‌منظور بررسی واکنش کنجد (*Sesamum indicum* L.) به خشکی به‌ویژه تأثیر محلول‌پاشی با آهن و اسید سالیسیلیک، آزمایشی در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ به‌صورت اسپلیت‌پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در مزرعه مجتمع آموزش عالی گناباد با سه تکرار انجام شد. سه سطح مختلف آبیاری (آبیاری کامل، قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی و از مرحله کپسول‌دهی تا انتهای فصل رشد) در کرت‌های اصلی، و محلول‌پاشی (یک میلی‌مولار) و عدم محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و ریزمغذی آهن (سه در هزار) به‌صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. بیشترین ارتفاع بوته در شرایط کاربرد همزمان اسید سالیسیلیک و آهن در آبیاری کامل (۸۲/۶۶ سانتی‌متر) و کمترین ارتفاع بوته در تیمار عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و آهن و شرایط قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی (۴۲/۶۶ سانتی‌متر) مشاهده شد. بیشترین تعداد دانه در کپسول در تیمار کاربرد همزمان محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن در تیمار قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی (۵۶/۶۶) و کمترین مقدار این صفت در شرایط عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و آهن و تیمار قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی (۲۲/۷۷ دانه در کپسول) به دست آمد. با قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی و گل‌دهی، عملکرد دانه به‌ترتیب ۳۹ و ۵۵ درصد نسبت به آبیاری کامل کاهش یافت و محلول‌پاشی آهن باعث افزایش عملکرد دانه به‌میزان ۱۸ درصد نسبت به عدم مصرف آهن شد. تیمار قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی، محلول‌پاشی همزمان اسید سالیسیلیک و آهن و محلول‌پاشی جداگانه اسید سالیسیلیک و آهن، شاخص برداشت را به‌ترتیب ۱۶، ۷ و ۶ درصد نسبت به عدم کاربرد محلول‌پاشی افزایش داد. به‌طور کلی، به نظر می‌رسد که محلول‌پاشی یک میلی‌مولار اسید سالیسیلیک و پنج در هزار آهن، اثرات منفی قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی و کپسول‌دهی در کنجد را کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: اسید آلی، شاخص برداشت، عملکرد دانه، عناصر ریزمغذی، قطع آبیاری

مقدمه

کنجد با نام علمی *Sesamum indicum* L. از تیره کنجدیان[۴]، یکی از قدیمی‌ترین و پرطرفدارترین دانه‌های روغنی شناخته‌شده دنیا است و در بین گیاهان دانه روغنی، دارای بالاترین میزان روغن و پرتئین دانه می‌باشد (Wei *et al*., 2015). کنجد حاوی کلیه اسیدهای آمینه و اسیدهای چرب ضروری بوده و سرشار از ویتامین‌ها و مواد معدنی مانند کلسیم و فسفر می‌باشد (Saudy, Eb-Samad, El-Temsah, & El-Gabry, 2022). این گیاه به‌طور معمول به‌عنوان یک گیاه مناطق خشک و نیمه‌خشک و مقاوم به کم‌آبی کشت می‌شود، بااین‌حال گزارش‌هایی مبنی بر تأثیر معنی‌دار آبیاری محدود، بر عملکرد کنجد و کاهش تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و عملکرد کل تحت تأثیر تنش خشکی نسبت به آبیاری کامل گزارش شده است (Ayobizadeh, Laei, Amini Dehghani, Sinaki, & Rezvan, 2020). گیاهان تحت شرایط طبیعی و زراعی به‌طور مداوم در معرض تنش‌های

۱- گروه تولیدات گیاهی، دانشکده کشاورزی، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران
۲- گروه اگروتکنولوژی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۳- پژوهشکده گیاهان و مواد اولیه دارویی، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران
(*- نویسنده مسئول:
Email: amiri@gonabad.ac.ir, mb.amiri@um.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2025.86586.1304
۴- Pedaliaceae

مختلف قرار می‌گیرند و در این بین، تنش خشکی مهم‌ترین عامل محدودکننده عملکرد گیاهان زراعی در بسیاری از نقاط جهان می‌باشد (Arvin, Vafabakhsh, & Mazaheri, 2018). مطابق با گزارش سالانه واردات روغن نباتی گمرک جمهوری اسلامی ایران، میزان واردات روغن نباتی کشور در سال ۱۴۰۱ حدود ۱/۲ میلیون تن برآورد شده که مؤید این مطلب است که قسمت اعظم روغن مورد نیاز کشور از خارج وارد می‌شود (IRICA, 2021) و با توجه به محدودیت منابع آب، توسعه کشت دانه‌های روغنی مقاوم به کمبود آب ضروری به نظر می‌رسد (Kazemi, Khajehosseini, Nezami, & Eskandari, 2016).

یکی از اثرات مهم تنش خشکی، برهم زدن تعادل تغذیه‌ای در گیاه (از طریق کاهش حلالیت و کاهش جذب عناصر) است (Heidari, Gelich, Gorbani, & Baradaran Firozabadi, 2016). با کاربرد عناصر غذایی کم‌مصرف از طریق محلول‌پاشی می‌توان وضعیت رشد گیاه را در شرایط تنش بهبود بخشید (Rezaeichiane, Khoramdel, Molodi, & Rahimi, 2017). در بین عناصر کم‌مصرف، آهن برای انجام بسیاری از فعالیت‌های سوخت‌وسازی گیاهان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ بنابراین گیاهان برای ادامه رشد خود نیاز به میزان کافی از این عنصر دارند. کمبود آهن بسته به عامل‌های پرشمار خاکی، محیطی و ژنتیکی گیاهان، سبب کاهش قابل ملاحظه عملکرد و کیفیت محصول می‌شود و تأمین کافی آهن از طریق بهبود فرآیندهای متابولیکی و افزایش کارآیی فتوسنتز و سیستم آنتی‌اکسیدانی، تحمل گیاه به شرایط خشکی را افزایش می‌دهد (Pandey, Sanjay, & Yadav, 2010; Heidari *et al.*, 2016). آهن در تنظیم باز و بسته شدن روزنه‌ها مؤثر است؛ در شرایط تنش خشکی، گیاه برای کاهش از دست دادن آب، روزنه‌ها را می‌بندد، ولی بسته ماندن طولانی‌مدت روزنه‌ها، جذب دی‌اکسید کربن و در نتیجه فتوسنتز را کاهش می‌دهد و محلول‌پاشی آهن، هدایت روزنه‌ای را بهبود بخشیده و منجر به افزایش جذب دی‌اکسید کربن می‌شود (Mahmoodi Sourestani, Moghadam, & Farrokhian Firoozi, 2016). ایوب زاده و همکاران (Ayoubizadeh *et al.*, 2020) بیان داشتند که بیشترین تعداد کپسول، تعداد دانه، وزن هزار دانه، عملکرد دانه و عملکرد کل کنجد در تیمار محلول‌پاشی نانو کلات آهن به همراه اسید فولیک حاصل شد. در پژوهشی دیگر، محلول‌پاشی ۰/۱۵ درصد نانواکسید آهن تعداد کپسول در بوته، وزن هزار دانه، عملکرد دانه، عملکرد کل و شاخص برداشت کنجد را تحت تنش خشکی به‌طور معنی‌داری بهبود بخشید (Karamian Hasan Abadi, Eisvand, Danehvar, & Akbarpour, 2021). حیدری و همکاران (Heidari *et al.*, 2016) اظهار داشتند که با کاربرد نانو اکسید آهن، عملکرد دانه در کنجد افزایش یافت. اثرات مثبت محلول‌پاشی آهن در کاهش خسارات ناشی از تنش خشکی در گلرنگ (*Carthamus tinctorius* L.) (Soheili- Movahhed, Khomari, Sheikhzadeh, & Alizadeh, 2020)، خیار (*Cucumis sativus* L.) (Shokri, Hooshmand, Golabi, Alemzade, & Struve 2022) و گندم (*Triticum aestivum* L.) (Rajaie, 2022) نیز گزارش شده است.

اسید سالیسیلیک یکی از تنظیم‌کننده‌های گیاهی است که در افزایش تحمل گیاهان به تنش‌هایی همچون خشکی مؤثر بوده و در تنظیم فرآیندهای فیزیولوژیک گیاه دارای نقش اساسی می‌باشد. افزایش جوانه‌زنی، القاء گل‌دهی، بهبود رشدونمو، افزایش میزان محصول و عملکرد میوه، بازدارندگی سنتز اتیلن و تأثیر در فعالیت‌های گیاهی از جمله باز و بسته شدن روزنه‌ها، روابط آبی، پایداری غشاء، جذب عناصر غذایی و فعال شدن عامل ایجاد مقاومت به بیماری از مواردی است که به کاربرد اسید سالیسیلیک نسبت داده می‌شود (Hafeez *et al.*, 2017; Ghassemi, Ghassemi-Golezani, & Zehtab Salami, 2019). اسید سالیسیلیک با کاهش پراکسیداسیون لیپیدها و حفظ یکپارچگی غشاهای سلولی، از آسیب به سلول‌ها در شرایط تنش خشکی جلوگیری می‌کند (Khan, Fatma, Per, Anjum, & Khan, 2015). این اسید با تأثیر بر کانال‌های یونی و پمپ‌های پروتونی در سلول‌های محافظ روزنه و کلر در شرایط تنش خشکی باعث تغییر در پتانسیل غشاء سلولی و خروج یون‌های پتاسیم از سلول‌های محافظ روزنه شده و در نهایت باعث بسته شدن روزنه‌ها می‌گردد (Miura & Tada, 2014). در یک پژوهش، کاربرد ۲۰۰ پی‌پی‌ام اسید سالیسیلیک در شرایط تنش خشکی منجر به تولید بیشترین عملکرد دانه در کنجد شد (Ahmed & Ali, 2024). در پژوهشی دیگر، در شرایط تنش خشکی بهره‌وری آب آبیاری تحت تأثیر کاربرد یک میلی‌مولار اسید سالیسیلیک، ۳۶ درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (Jahan, Javadi, Hesami, & Amiri, 2021). کاربرد ۲۵ میلی‌گرم در لیتر اسید سالیسیلیک افزایش معنی‌دار تعداد کپسول در بوته، وزن خشک کپسول، وزن هزار دانه و عملکرد دانه کنجد را در مقایسه با شاهد در پی داشت (Alizadeh, Balouchi, & Yadavi, 2016). بهبود عملکرد دانه با محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک در سویا (*Glycine max* L.) (Razmi, Ebadi, Daneshian, & Jahanbakhsh, 2017) و آفتابگردان (*Helianthus annuus* L.) (Hussain *et al.*, 2009) گزارش شده است.

ازآنجایی‌که کنجد عمدتاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک که با محدودیت منابع آبی روبه‌رو هستند کشت می‌شود و به‌منظور ارزیابی مقاومت گیاه به کم‌آبی در مراحل حساس رشد (گل‌دهی و کپسول‌دهی)، این پژوهش با هدف بررسی محلول‌پاشی آهن و اسید سالیسیلیک بر ویژگی‌های رشدی و عملکرد کنجد در شرایط کم‌آبیاری انجام شد.

مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی اثر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن بر بعضی خصوصیات رشدی و عملکرد کنجد در شرایط کم‌آبیاری، آزمایشی در سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹ در مزرعه آموزشی تحقیقاتی مجتمع آموزش عالی گناباد با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴۵ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۰۶۰ متر از سطح دریا، به‌صورت اسپلیت‌پلات فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام شد. سه سطح مختلف آبیاری (آبیاری کامل، قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی و از مرحله کپسول‌دهی تا انتهای فصل رشد) در کرت‌های اصلی و کاربرد و عدم کاربرد اسید سالیسیلیک (یک میلی‌مولار) (Jahan & Amiri, 2018) و ریزمغذی آهن (پنج در هزار) (Ahmadi, Seyfi, & Amini, 2013) به‌صورت فاکتوریل در کرت‌های فرعی قرار گرفتند. ابعاد کرت‌های اصلی ۸×۲ متر، ابعاد کرت‌های فرعی ۲×۲ متر، فاصله بین کرت‌ها ۰/۵ متر و فاصله بین بلوک‌ها یک متر در نظر گرفته شد. به‌منظور حفظ پایداری خاک، جهت آماده‌سازی زمین، تنها عملیات دیسک‌زنی با تأکید بر خاک‌ورزی حداقل مدنظر قرار گرفت و کلیه مراحل بعدی توسط کارگر و با بیل دستی انجام شد. قبل از شروع آزمایشات مزرعه‌ای، به‌منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری خاک نمونه‌برداری انجام گرفت (جدول ۱). اطلاعات هواشناسی منطقه مورد پژوهش در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک مزرعه آزمایشی

Table 1- Physiochemical properties of experimental soil

شوری EC (dS m^{-1})	اسیدیته pH	کربن آلی Organic carbon (%)	پتاسیم Potassium (mg kg^{-1})	فسفر Phosphorus (mg kg^{-1})	نیتروژن کل Total nitrogen (%)	بافت Texture
4.5	8.1	22.3	101	8	0.018	شنی لومی Loam-sand

جدول ۲- اطلاعات هواشناسی منطقه مورد پژوهش

Table 2- Meteorological information of research area

	فروردین April	اردیبهشت May	خرداد June	تیر July	مرداد August	شهریور September
بارندگی Rainfall (mm)	0	49.5	0.5	0.5	0	0
متوسط دما ماهیانه Mean temperature in month (°C)	19.2	23.5	30.5	30.9	29.7	26.8
حداکثر دمای ماهیانه Maximum temperature in month (°C)	26.4	36.5	42.4	42.8	39.7	38.8
حداقل دمای ماهیانه Minimum temperature in month (°C)	3.3	13	18.9	17.2	16.7	15.4
میزان تبخیر و تعرق Evaporation and transpiration (mm)	259.4	282.1	460.3	434.2	404.2	348.1

بذرهای کنجد با منشأ توده محلی از مزارع شهرستان گناباد تهیه و ۲۰ اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۰ در ردیف‌هایی به فاصله ۵۰ سانتی‌متر و با فاصله روی ردیف پنج سانتی‌متر (تراکم کاشت ۴۰ بوته در مترمربع) از یکدیگر کشت شد. اولین آبیاری بلافاصله پس از کاشت به‌روش نشتی انجام شد و آبیاری‌های بعدی به فاصله هر هفت روز یک‌بار تا آخر فصل رشد بسته به تیمارهای آبیاری اعمال گردید. گل‌دهی و کپسول‌دهی در کنجد به‌ترتیب در تاریخ‌های ۲۰ تیرماه و ۲۰ مردادماه سال ۱۴۰۰ به وقوع پیوست و قطع آبیاری از مرحله گل‌دهی و کپسول‌دهی تا انتهای فصل رشد به‌ترتیب به‌مدت ۶۰ و ۳۰ روز در شرایطی اعمال گردید که براساس جدول اطلاعات هواشناسی (جدول ۲)، هیچ‌گونه بارندگی طی این مدت رخ نداد و خاک محل آزمایش از رطوبت چندانی برخوردار نبود. محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن در مرحله شش تا هفت برگی (حدود ۳۰ روز پس از کاشت) (Jahan & Amiri, 2018) انجام شد. برای رسیدن به تراکم مناسب، پس از رسیدن گیاه به مرحله چهار برگی، عملیات تنک کردن صورت گرفت. به‌منظور مهار علف‌های هرز، چندین نوبت وجین دستی (به‌ترتیب ۱۵،

۳۰ و ۴۵ روز پس از کاشت) انجام شد. برای آماده‌سازی زمین و در طول دوره رشد (حدود ۱۲۰ روز)، هیچ‌گونه علف‌کش، آفت‌کش و قارچ‌کش شیمیایی استفاده نشد.

در اواخر فصل رشد (۲۰ شهریورماه ۱۴۰۰)، با آغاز مرحله رسیدگی دانه‌ها و خشک شدن اندام هوایی گیاه، بوته‌های ۰/۱ مترمربع از هر کرت آزمایشی به‌طور تصادفی انتخاب و صفاتی نظیر ارتفاع بوته، وزن خشک اندام هوایی، تعداد کپسول در بوته، تعداد دانه در کپسول، تعداد دانه در بوته، وزن دانه در بوته و وزن هزار دانه اندازه‌گیری شد. برای تعیین وزن خشک اندام هوایی، بوته‌ها به‌مدت ۴۸ ساعت در آون در دمای ۷۲ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت و سپس وزن آن‌ها برآورد شد و وزن دانه در بوته و وزن هزار دانه نیز تعیین گردید. جهت تعیین عملکرد دانه، عملکرد کل و شاخص برداشت، پس از حذف اثر حاشیه‌ای، بوته‌های تمام سطح کرت‌های آزمایشی برداشت و وزن کل و دانه آن‌ها تعیین گردید.

تجزیه و تحلیل داده‌ها (ANOVA) و ترسیم نمودارها با استفاده از نرم‌افزارهای SAS Ver. 9.4 و MS Excel Ver. 11 و مقایسه میانگین تیمارها با استفاده از آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح احتمال پنج درصد انجام شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته و وزن خشک بوته

ارتفاع بوته در تیمارهای قطع آبیاری و عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و آهن به‌طور معنی‌داری با تیمار آبیاری کامل در شرایط کاربرد و عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و آهن تفاوت داشت (جدول ۳)؛ بیشترین ارتفاع بوته در شرایط کاربرد همزمان اسید سالیسیلیک و آهن در آبیاری کامل (سانتی‌متر ۸۲/۶۶) و کمترین ارتفاع بوته در شرایط عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و آهن و تیمار قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی (سانتی‌متر ۴۲/۶۶) به دست آمد (جدول ۴). در هر دو شرایط قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی و کپسول‌دهی، کمترین مقدار ارتفاع بوته در شرایط عدم استفاده از محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن مشاهده شد (جدول ۴). کاربرد عنصر ریزمغذی آهن به‌طور معنی‌داری باعث افزایش ۱۴ درصدی وزن خشک بوته نسبت به تیمار عدم استفاده از این عنصر شد (جدول ۵). وزن خشک بوته در تیمار قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی تحت تأثیر محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک قرار گرفت و محلول‌پاشی باعث افزایش ۳۰ درصدی وزن خشک بوته نسبت به عدم کاربرد آن شد (جدول ۶).

تنش خشکی باعث ایجاد رقابت بیش از حد بین بوته‌ها برای به دست آوردن آب می‌شود که این امر در نهایت منجر به کاهش تخصیص مواد فتوسنتزی به ساقه و کوتاهی گیاه می‌شود (Kalantari, Armin, & Marvi, 2021). احتمالاً محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک از طریق تأثیر بر آنزیم‌های کاتالاز و پروکسیداز (این آنزیم‌ها گونه‌های فعال اکسیژن را به آب و اکسیژن تجزیه نموده و مانع تجمع پراکسید هیدروژن می‌شوند و تنش اکسیداتیو ناشی از تنش خشکی را کاهش می‌دهند) و سایر تنظیم‌کننده‌های اسمزی نظیر پرولین، گلیسین و بتائین (این ترکیبات به‌عنوان اسمولیت عمل نموده و منجر به حفظ ساختار پروتئین‌ها و غشاهای سلولی در شرایط خشکی شده و فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی را افزایش می‌دهند) آثار ناشی از تنش خشکی را کاهش داده (Azhdar Afshari, Shekari, Afsahi, & Azikhani, 2016) و در نهایت منجر به افزایش ارتفاع بوته و وزن خشک در کنجد شد. به نظر می‌رسد که افزایش ارتفاع بوته و وزن خشک بوته در تیمارهای قطع آبیاری با محلول‌پاشی آهن احتمالاً به‌دلیل نقش اصلی آهن در متابولیسم کلرفیل باشد. آهن به‌عنوان کوفاکتور در بسیاری از آنزیم‌های دخیل در فعالیت‌های سلولی از قبیل فتوسنتز، تنفس و تمایز سلولی شرکت دارد و کارآیی اندامک‌های فتوسنتزی را افزایش می‌دهد (Bybordi & Mamedov, 2010). هایلو و همکاران (Hailu, Urga, Sori, Borona, & Tufa, 2018) نیز نشان دادند که کاهش میزان آب آبیاری بعد از گل‌دهی در کنجد سبب کاهش ارتفاع بوته شد. نتایج پالاوی و همکاران (Pallavi, Reena, Surabhi, & Sahu, 2022) نشان داد که کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط کم‌آبی باعث افزایش خصوصیات ریخت‌شناختی مانند ارتفاع بوته، تعداد شاخه در بوته، وزن برگ تر و تعداد کل برگ در نخود سبز (*Pisum sativum* L.) شد.

تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول

تعداد کپسول در بوته، تحت تأثیر تیمارهای مختلف آبیاری، محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن قرار گرفت (جدول ۳). تیمارهای قطع آبیاری به‌طور معنی‌داری باعث کاهش تعداد کپسول در بوته نسبت به آبیاری کامل شد. میانگین تعداد کپسول در قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی ۳۶/۸۸ عدد و میانگین تعداد کپسول در قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی ۳۰/۶۳ عدد نسبت به میانگین تعداد کپسول در آبیاری کامل کاهش نشان داد (جدول ۵). با وجود کاهش تعداد کپسول در تیمارهای قطع آبیاری (جدول ۵)، با کاربرد اسید سالیسیلیک تفاوت معنی‌داری از نظر تعداد کپسول در بوته در تیمارهای مختلف آبیاری مشاهده نشد (جدول ۶).

پس از بررسی اثر متقابل محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و عنصر ریزمغذی آهن با تیمار آبیاری مشخص شد که بیشترین تعداد دانه در کپسول در تیمار کاربرد همزمان محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن در تیمار قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی (۵۶/۶۶) و کمترین مقدار این صفت در شرایط عدم کاربرد اسید سالیسیلیک و آهن و تیمار قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی (۲۲/۷۷ دانه در کپسول) به دست آمد

(جدول ۴).

جدول ۳- تجزیه واریانس برخی از خصوصیات رشدی و عملکرد کنجد تحت تأثیر تیمارهای آبیاری و محلول‌پاشی آهن و اسید سالیسیلیک
Table 3- Analysis of variance of some growth characteristics and yield in sesame effected by irrigation treatments and Fe and salicylic acid spraying

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع بوته Plant height	وزن خشک بوته Plant dry weight	تعداد کپسول در بوته Number of capsule per Plant	تعداد دانه در کپسول Number of seed in per capsule	عملکرد دانه Seed yield	عملکرد کل Total yield	شاخص برداشت Harvest index
بلوک Block	2	48.68^{ns}	128.36^{ns}	125.79^{ns}	45.66^{ns}	96773.01^{ns}	1785132.78^{ns}	0.29^{ns}
آبیاری Irrigation	2	521.99**	3885.36**	4673.36**	247.89*	3600789.13**	17263124.74**	319.53**
خطای اصلی Main error	4	104.94	30.69	56.89	55.51	194194.10	3391967.24	0.05
اسید سالیسیلیک Salicylic acid	1	718.53**	367.36**	840.96**	1238.64**	296552.85^{ns}	3357140.12^{ns}	15.08**
آهن Fe	1	1429.26**	684.69**	1768.62**	116.76^{ns}	498388.93*	3351516.60^{ns}	16.40**
آبیاری×اسید سالیسیلیک Irrigation×salicylic acid	2	133.12**	216.19*	214.18^{ns}	168.09^{ns}	72366.15^{ns}	868450.14^{ns}	2.98**
آبیاری×آهن Irrigation × Fe	2	40.07^{ns}	71.02^{ns}	52.63^{ns}	125.64^{ns}	291375.28*	3621879.34^{ns}	0.65**
اسید سالیسیلیک×آهن Salicylic acid ×Fe	1	140.68*	8.02^{ns}	143.98^{ns}	31.79^{ns}	101963.13^{ns}	3931560.89^{ns}	2.10**
آبیاری×اسید سالیسیلیک×آهن Irrigation×salicylic acid×Fe	2	177.63**	7.52^{ns}	27.64^{ns}	252.83*	43958.02^{ns}	949640.06^{ns}	0.01^{ns}
خطای فرعی Sub error	18	25.158	38.95	93.84	55.73	86568.56	1204939.19	0.09
ضریب تغییرات CV (٪)	-	7.4	14.0	25.8	16.1	24.2	21.7	1.3

*، ** و ns: به‌ترتیب اختلاف معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم اختلاف معنی‌دار

* are **: are significant at the probability levels of 5 and 1% and non-significant, respectively

کاهش تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در بوته با اعمال تنش خشکی با یافته‌های کرمیان حسن آبادی و همکاران (Karamian Hasan Abadi *et al.*, 2021) مطابقت داشت که دلیل آن را به نقش تنش خشکی در کاهش تولید مواد فتوسنتزی، کاهش رشد رویشی و تولید شاخه‌های اصلی و فرعی و افزایش ریزش کپسول بوته مرتبط دانستند. اعمال تیمارهای تنش خشکی روی گیاه، موجب کاهش هدایت روزنه‌ای و به‌تبع آن کاهش تثبیت دی‌اکسید کربن و سرعت فتوسنتز می‌گردد. این عوامل باعث کاهش مشخصه‌های رشدی می‌شوند که ممکن است به‌دلیل کاهش جریان آب در آوندهای چوبی رخ داده و در نهایت منجر به کاهش تقسیم سلولی، رشدونمو، کاهش محتوای کلروفیل و پراکسیداز لیپیدها در غشاء سلول‌ها می‌شود (Pallavi *et al.*, 2022). نقش اصلی اسید سالیسیلیک در بهبود خصوصیات رشدی ممکن است به‌دلیل افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی که گیاه را از خسارت تنش اکسیداتیو حفظ می‌کند (Pallavi *et al.*, 2022) یا کاهش سطوح (ROS) و پراکسیداسیون چربی‌ها مثل نشت یون (Nazar, Iqbal, Syeed, & Khan, 2011) باشد. ایوبی زاده و همکاران (Ayobizadeh *et al.*, 2017) گزارش کردند که کاربرد نانوکلات آهن موجب افزایش تعداد کپسول در بوته کنجد شد. همچنین گزارش شده است که نانواکسید آهن تعداد کپسول در بوته کنجد را ۳۵/۰۷ درصد نسبت به شاهد

افـزایش داد (Karamian Hasan Abadi *et al.*, 2021). بـه نظر می‌رسد که دلیل افزایش تعداد دانه در کپسول به نقش آهن در بهبـود رشـدونمو، ارتفـاع بوتـه و فراهمـی مـواد فتوسـنتزی مـرتبط باشـد Karamian Hasan Abadi *et al.*, 2021; Ayobizadeh *et al.*, 2017). تعداد دانه در کپسول تحت تـأثیر زمـان قطـع آبیـاری قـرار گرفت، به‌طوری‌که قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی بـه‌میزان بیشـتری باعث کاهش تعداد دانه در کپسول شد. به نظر می‌رسد که کـم بـودن تعداد دانه در بوته در مرحله گل‌دهی به‌دلیل کاهش تعـداد کپسـول‌ها در بوته تحت تأثیر تیمار اعمال تنش باشد و با قطع آبیاری در مرحلـه گل‌دهی، چون گیاه از ابتدای رشد زایشی با تنش کم‌آبی مواجه شـده، احتمالاً سازوکار خودتنظیمی گیـاه بـر پایـه تعـداد محـدودی دانـه در کپسول بنا شده (Kalantari *et al.*, 2021) و در نهایت تعداد دانه در بوته کاهش یافته است. حیدری و همکاران (Heidari *et al.*, 2016) اظهار داشتند که با کاربرد نانواکسـید آهـن، عملکـرد دانـه در کنجـد افزایش یافت. افزایش تعداد دانه در بوته می‌تواند به نقـش ریزمغـذی آهن در بهبود صفات وابسته به عملکرد همچون تعداد کپسول در بوته و تعداد دانه در کپسول مـرتبط باشـد (Ayobizadeh *et al.*, 2017). کاربرد اسید سالیسیلیک موجب بهبود کلیه صفات مورد بررسی نـه‌تنها در شرایط آبیاری کامل که در تنش‌های آبیاری شد. اسید سالیسـیلیک به کاهش خسارت ناشی از تنش‌های غیرزیستی در گیاه کمک می‌کند (Ayobizadeh *et al.*, 2017; Pallavi *et al.*, 2022).

جدول ٤- مقایسه میانگین اثرات متقابل آبیاری و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک و آهن بر بعضی ازخصوصیات کمّی کنجد

Table 4- Mean comparison of interaction effect of irrigation and salicylic acid spraying and Fe spraying on some quantitative characteristics of sesame

			ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد دانه در کپسول Seed number per capsule
آبیاری کامل Full irrigation	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	آهن Fe	82.66[a*]	52.77[ab]
		عدم آهن Non Fe	68.00[bc]	48.50[ab]
	عدم اسید سالیسیلیک Non salicylic acid	آهن Fe	76.50[ab]	39.22[b]
		عدم آهن Non Fe	71.66[abc]	51.22[ab]
قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی Cut-off irrigation at the flowering stage	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	آهن Fe	72.44[abc]	49.77[ab]
		عدم آهن Non Fe	63.66[c]	52.66[ab]
	عدم اسید سالیسیلیک Non salicylic acid	آهن Fe	67.33[bc]	39.66[b]
		عدم آهن Non Fe	42.66[d]	22.77[c]
قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی Cut-off irrigation at the podding stage	اسید سالیسیلیک Salicylic acid	آهن Fe	75.16[abc]	56.66[a]
		عدم آهن Non Fe	72.66[abc]	52.88[ab]
	عدم اسید سالیسیلیک Non salicylic acid	آهن Fe	71.50[bc]	50.77[ab]
		عدم آهن Non Fe	51.33[d]	39.22[b]

* در هر ستون، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند

* In each column, means with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level

عملکرد کل و عملکرد دانه

با توجه به جـدول تجزیـه واریـانس، عملکـرد کـل تحـت تـأثیر تیمارهای مختلف آبیاری قرار گرفت (جدول ۳). بیشترین عملکرد کل در تیمار آبیاری کامل (۶۳۸۹/۲۴ کیلوگرم در هکتار) و کمترین مقـدار آن در تیمار قطع آبیاری در مرحلـه گـل‌دهی (۴۰۵۴/۴۰ کیلـوگرم در هکتار) مشاهده شد (جدول ۵). محلول‌پاشی آهن و تیمارهـای آبیـاری به‌طور معنی‌داری بر عملکرد دانه تأثیر داشتند (جدول ۳)، به‌طوری‌کـه

با قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی و گل‌دهی، عملکرد دانه به‌ترتیب ۳۹ و ۵۵ درصد نسبت بـه آبیـاری کامـل کـاهش یافـت (جـدول ۵). محلول‌پاشی آهن باعث افزایش عملکرد دانه به‌میزان ۱۸ درصد نسبت به عدم مصرف آهن شد (جدول ۵). همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بیشترین عملکرد دانه در تیمار آبیاری کامـل و کـاربرد اسـید سالیسیلیک (۱۸۱۵/۱۹ کیلـوگرم در هکتـار) و کمتـرین مقـدار آن در تیمار قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی و عدم کاربرد اسـید سالیـسیلیک (۶۲۵/۵۷ کیلوگرم در هکتار) به دست آمـد. کـاربرد عنصـر ریزمغـذی آهن نیز در شرایط آبیاری کامـل، عملکـرد دانـه را نسـبت بـه شـاهد افزایش داد (شکل ۲).

در شرایط تنش خشکی، عملکرد دانه و عملکرد کل کاهش یافت. فرح‌بخش و فـرح‌بخش (Farahbakhsh & Farahbakhsh, 2015) گزارش کردند که تنش خشـکی در مرحلـه گـل‌دهی و کپسـول‌دهـی کنجد به‌ترتیب باعث کاهش ۵۶ و ۴۵ درصدی عملکرد دانه نسبت به آبیاری کامل شد و کاهش عملکرد کل تحـت تـنش خشـکی نیـز در پژوهش اسکندری و همکاران (Eskandari, Zehtab Salmasi, & Ghasemi-Golezani, 2010) گزارش شد.

در پژوهش‌های دیگـری، کـاهش عملکـرد کـل (Mehrabi & Ehsanzade, 2011) و دانـه (Gholinezhad & Darvishzadeh, 2015) تحت شرایط تنش خشـکی گـزارش شـد. در یـک پـژوهش، کاربرد نانوکلات آهن و نانواکسید آهن باعث بهبود معنـی‌دار عملکـرد کل و عملکرد دانه شـد (Karamian Hasan Abadi *et al.*, 2021) و علت این اثرات مثبت به نقش عنصـر آهـن در فعالیـت فتوسـنتزی، افزایش شاخه‌های فرعی، افزایش تعداد کپسول، تعداد دانه در بوتـه و متعاقب آن افزایش وزن خشک بوته ارتباط داده شد. تأثیر اسید سالیسیلیک به‌عنوان یک ماده ضدتعرق، منجـر بـه بهبـود شـاخص‌های تحمل به تنش شد. اسید سالیسیلیک با ممانعت از باز شدن روزنه‌ها، مقاومت گیاه را نسبت به تنش خشـکی افـزایش می‌دهـد و ایـن مـاده احتمـالاً از طریـق تـأثیر بـر آنزیم‌های کاتالاز و پروکسیداز، آثار ناشی از تنش خشکی را کـاهش داده (Bayat, Sepehri Zare, Abyaneh, & Abdollahi, 2010; Jahan & Amiri, 2019)، لذا بهبود شاخص‌های تحمل به تنش در شرایط استفاده از این نهاده مـورد انتظار اسـت. افـزایش عملکـرد دانـه بـا محلول‌پاشـی اسـید سالیـسیلیک در سـویا (Razmi, Ebadi, Daneshian, & Jahanbakhsh, 2017)، ارزن (Hussain *et al.*, 2009) و آفتـابگردان (Kolupaev *et al.*, 2011) گـزارش شده است.

جدول ۵- مقایسه میانگین اثرات ساده تیمارهای آبیاری، محلول‌پاشی آهن و اسید سالیسیلیک بر بعضی از خصوصیات کمّی کنجد

Table 5- Mean comparison of effect of irrigation treatments, Fe and salicylic acid spraying on some quantitative characteristics of sesame

	وزن خشک بوته Plant dry weight (g)	تعداد کپسول در بوته Capsule number per plant	عملکرد کل Total yield (kg.h^{-1})
آبیاری **Irrigation**			
آبیاری کامل Full irrigation	64.16^{a*}	60.08^{a}	6389.24^{a}
قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی Cut-off irrigation at the flowering stage	28.83^{c}	23.20^{b}	4054.40^{b}
قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی Cut-off irrigation at the podding stage	40.58^{b}	29.45^{b}	4745.20^{ab}
اسید سالیسیلیک **Salicylic acid**			
کاربرد Application	47.72^{a}	42.41^{a}	5368.32^{a}
عدم کاربرد Non-application	41.33^{b}	32.75^{b}	4757.57^{a}
آهن **Fe**			
کاربرد Application	48.88^{a}	44.59^{a}	5368.07^{a}
عدم کاربرد Non-application	40.16^{b}	30.57^{b}	4757.83^{a}

* در هر ستون و برای هر اثر ساده، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند

* In each column and for each simple effect, means with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level

جدول ٦- مقایسه میانگین اثرات متقابل آبیاری و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک (قسمت بالا) و آبیاری و محلول‌پاشی آهن (قسمت پایین) بر بعضی از خصوصیات کمّی کنجد

Table 6- Mean comparison of interaction effect of irrigation and salicylic acid spraying (up part) and irrigation and Fe spraying (down part) on some quantitative characteristics of sesame

		ارتفاع بوته Plant height (cm)	وزن خشک بوته Plant dry weight (g)	شاخص برداشت Harvest Index
آبیاری کامل Full irrigation	کاربرد اسید سالیسیلیک Application of salicylic acid	75.33a*	62.83a	28.30a
	عدم کاربرد اسید سالیسیلیک Non- application of salicylic acid	74.38ab	65.50a	28.08a
قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی Cut-off irrigation at the flowering stage	کاربرد اسید سالیسیلیک Application of salicylic acid	68.05ab	32.66c	18.61e
	عدم کاربرد اسید سالیسیلیک Non- application of salicylic acid	55.00c	25.00c	17.33f
قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی Cut-off irrigation at the podding stage	کاربرد اسید سالیسیلیک Application of salicylic acid	73.91ab	47.66b	24.36c
	عدم کاربرد اسید سالیسیلیک Non- application of salicylic acid	61.41bc	33.50c	22.18d
آبیاری کامل Full irrigation	کاربرد آهن Application of Fe	79.58a	71.33a	28.70a
	عدم کاربرد آهن Non- application of Fe	69.83ab	57.00b	27.68a
قطع آبیاری در مرحله گل‌دهی Cut-off irrigation at the flowering stage	کاربرد آهن Application of Fe	69.88ab	31.66df	18.45d
	عدم کاربرد آهن Non- application of Fe	53.16c	26.00f	17.30e
قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی Cut-off irrigation at the podding stage	کاربرد آهن Application of Fe	73.33ab	43.66c	24.21b
	عدم کاربرد آهن Non- application of Fe	62.00bc	37.50cd	22.33c

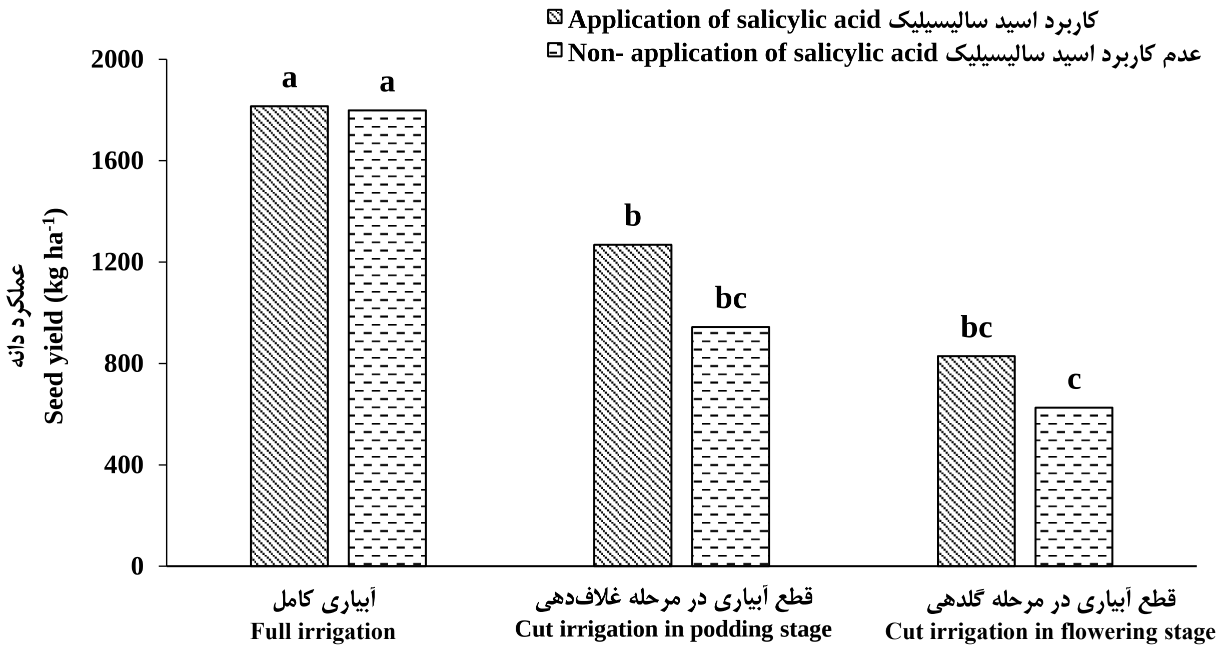
* در هر ستون و برای هر قسمت (بالا و پایین)، میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، با یکدیگر تفاوت معنی‌داری ندارند

* In each column and for each part (up and down), means with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level

شاخص برداشت

کاربرد اسید سالیسیلیک در شرایط آبیاری کامل تأثیر چندانی در بهبود شاخص برداشت نداشت، ولی در هر یک از شرایط تنش خشکی، قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی و گل‌دهی، شاخص برداشت تحت تأثیر اسید سالیسیلیک به‌ترتیب نُه و هفت درصد نسبت به شاهد افزایش یافت (جدول ۶). در شرایط تنش خشکی، کاربرد محلول‌پاشی آهن سبب افزایش معنی‌دار شاخص برداشت نسبت به عدم کاربرد آهن شد، به‌طوری‌که در تیمارهای قطع آبیاری در مرحله کپسول‌دهی و گل‌دهی، محلول‌پاشی آهن سبب افزایش هشت و شش درصدی شاخص برداشت نسبت به عدم کاربرد آهن در تیمارهای مذکور شد (جدول ۶).

نتایج نشان داد که تنش خشکی منجر به کاهش شاخص برداشت کنجد شد که با نتایج سایر محققان مطابقت داشت (Ayobizadeh *et al.*, 2017)؛ امّا در چنین شرایطی، کاربرد نانواکسید آهن به‌طور متوسط ۳/۸۶ درصد این صفت را نسبت به شاهد افزایش داد (Karamian Hasan Abadi *et al.*, 2021). به نظر می‌رسد که علت کاهش شاخص برداشت در شرایط تنش خشکی احتمالاً به‌دلیل تأثیر بیشتر کمبود رطوبت بر فرآیندهای زایشی در مقایسه رشد رویشی باشد (Ayobizadeh *et al.*, 2017).

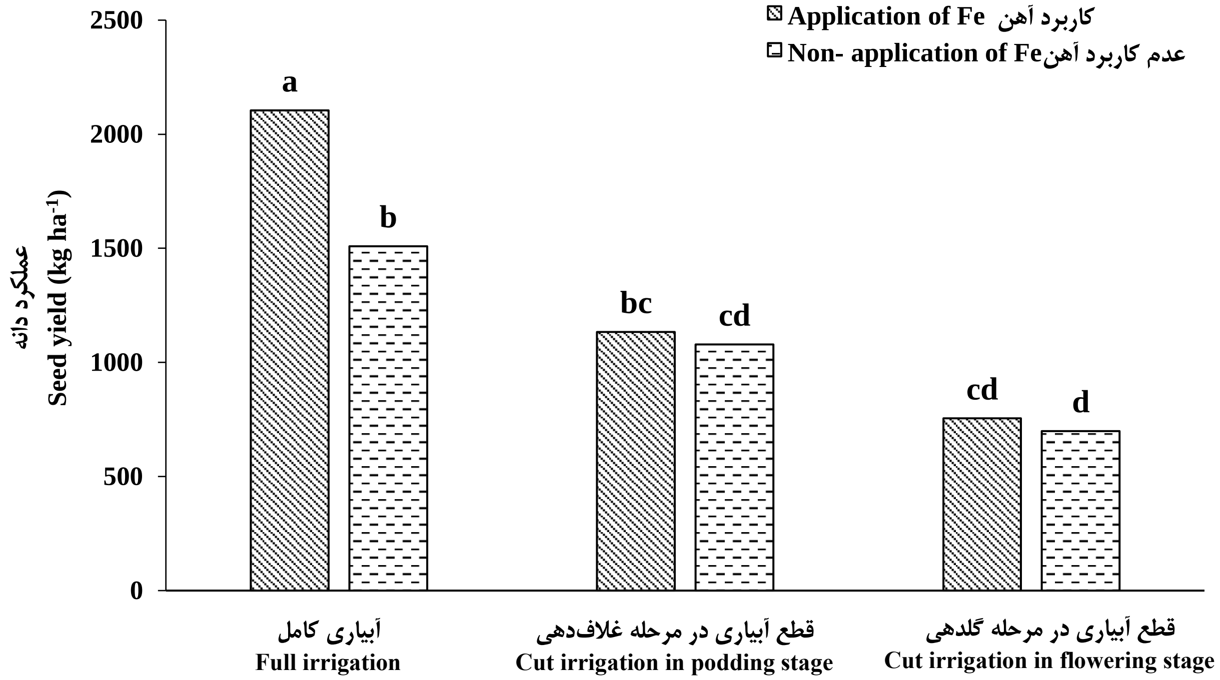


شکل ۱- اثرات متقابل آبیاری و محلول‌پاشی اسید سالیسیلیک بر عملکرد دانه کنجد

Figure 1- Interaction effect of irrigation and salicylic acid spraying on seed yield of sesame

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

Means with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level



شکل ۲- اثرات متقابل آبیاری و محلول‌پاشی آهن بر عملکرد دانه کنجد

Figure 2- Interaction effect of irrigation and Fe spraying on seed yield of sesame

میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک، در سطح احتمال پنج درصد، تفاوت معنی‌داری با یکدیگر ندارند

Means with at least one similar letter are not significantly different at the 5% probability level

عنصر ریزمغذی آهن به یک میزان بر عملکرد دانـه و کـل مـؤثر نبود، به‌طوری‌که با کاربرد آهن، افزایش بیشتری در عملکرد دانـه (۱۷ درصد) نسـبت بـه عملکـرد کـل (۱۱ درصـد) مشـاهده شـد و نقـش به‌سزایی در افـزایش شـاخص برداشـت کنجـد داشـت کـه بـا نتـایج کریمیان و همکـاران (Karamian Hasan Abadi *et al.*, 2021) و بحرانی و پوررضا (Bahrani & Pourreza, 2015) مطابقت داشـت. با توجه به نقش اسید سالیسیلیک در بهبود ویژگی‌هـای رشـدی گیـاه احتمالاً میزان فتوسنتز و بـه‌تبع آن شـیره پـرورده گیـاه و تـوان تولیـد متابولیت‌های ثانویه گیاه افـزایش پیـدا کـرده (Heydarnejadiyan, Maleki, & Babaei, 2021) و در نتیجـه خصوصـیات رشـدی و عملکرد کنجد بهبـود یافتـه اسـت. تـأثیر بیشـتر تیمـار محلول‌پاشـی همزمان اسید سالیسیلیک و آهن بر صفت شـاخص برداشـت ممکـن است به اثـرات مثبـت اسـید سالیسـیلیک بـر جـذب عناصـر غـذایی (Heydarnejadiyan *et al.*, 2021) مرتبط باشد.

نتیجه‌گیری

کاربرد آهن و اسید سالیسیلیک سبب افزایش ارتفاع بوتـه، تعـداد کپسول در بوته، تعداد دانـه در بوتـه، عملکـرد کـل، عملکـرد دانـه و شاخص برداشت در شرایط قطع آبیاری شدند. قطع آبیـاری در مرحلـه گل‌دهی، خسارت شدیدتری به گیاه وارد کرد که منجر بـه کـاهش در صفات اقتصادی کنجد شد. با وجود خسارات وارده بـه گیـاه بـا قطـع آبیاری در مرحله کپسـول‌دهی بـا کـاربرد آهـن و اسـید سالیسـیلیک به‌صورت مجزا و همزمان اکثر صفات بهبود یافت. با توجه بـه نتـایج، عنصر ریزمغذی آهن باعث بهبود اکثر صفات مورد بررسی در شـرایط قطع آبیاری شد، به‌طوری‌که اکثر صفات با محلول‌پاشـی آهـن تحـت شرایط خشکی بـا آبیـاری کامـل از نظـر آمـاری تفـاوت معنـی‌داری نداشتند. کاربرد اسید سالیسیلیک نیز علاوه‌بر تأثیر مثبـت بـر صـفات اقتصادی کنجد در شرایط آبیاری کامل باعث بهبود صفات در شـرایط قطع آبیاری شد. علاوه‌بر اثر مثبت اسید سالیسیلیک و آهن به‌صـورت جداگانه روی خصوصیات مورفولوژیک کنجد، کاربرد همزمان آن‌ها در کلیه تیمارهای قطع آبیاری سبب افزایش چشمگیری در اکثـر صـفات شد. با توجه به تأثیر مثبت اسید سالیسیلیک و آهن بـر صـفاتی چـون ارتفاع بوته، تعداد کپسول در گیاه، تعداد دانه در کپسول، عملکرد دانه، عملکرد کل و شاخص برداشت کنجد در شرایط قطع آبیاری در مرحله کپسـول‌دهی و گـل‌دهی، بـه نظـر می‌رسـد کـه در اقلـیم خشـک و نیمه‌خشک ایران می‌توان با کاهش میزان آبیاری در کنار محلول‌پاشی بـا عناصـر ریزمغـذی همچـون آهـن و اسـید سالیسـیلیک علاوه‌بـر صرفه‌جویی در مصرف آب کشاورزی از ضرر اقتصادی ناشی از تـنش خشکی جلوگیری کرد و میزان تولید این محصول ارزشـمند را بهبـود بخشید.

References

1. Ahmadi, J., Seyfi, M. M., & Amini, M. (2013). Effect of spraying micronutrients Fe, Zn and Ca on grain and oil yield of sesame (*Sesemum indicum* L.) varieties. *Crop Production*, *5*(3), 115-130. (in Persian) https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008739.1391.5.3.7.0
2. Ahmed, N. J., & Ali, K. A. (2024). Influence of salicylic acid under different levels of drought stress on growth, yield, and chemical content in sesame crop. *Passer Journal of Basic and Applied Sciences*, *6*(2), 344-350. https://doi.org/10.24271/psr.2024.448491.1537
3. Alizadeh, M., Balouchi, H. R., & Yadavi, A. (2016). The effect of priming and irrigation water quality on seed and oil yield and yield components of two sesames (*Sesamum indicum* L.). *Plant Productions*, *39*(2), 115-125. https://doi.org/10.22055/ppd.2016.12051
4. Arvin, P., Vafabakhsh, J., & Mazaheri, D. (2018). Study of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and drought on physiological traits and ultimate yield of cultivars of oilseed rape (*Brassica* spp.). *Journal of Agroecology*, *9*(4), 1208-1226. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jag.v9i4.61808
5. Ayobizadeh, N., Laei, G., Amini Dehaghi, M., Masood Sinaki, J., & Bidokhti, S. R. (2017). Effect of nanoFe and folic acid foliar application on yield and yield components of sesame varieties after wheat cultivation under drought stress conditions. *Journal of Crop Production Research*, *9*, 283-312. (in Persian with English abstract)
6. Ayoubizadeh, N., Laei, G., Amini Dehaghi, M., Masoud Sinaki, J., & Rezvan Bidokhti, S. (2020). Effect of drought stress and foliar nutrition of Fe nano-chelate and fulvic acid on grain yield and fatty acids composition in seed oil of two sesame cultivars. *Journal of Crops Improvement*, *22*(2), 231-243. (in Persian) https://doi.org/10.22059/jci.2020.281730.2220
7. Azhdar Afshari, M. A., Shekari, F., Afsahi, K., & Azimkhani, R. (2016). Effect of florial applied salicylic acid on dry weight, harvest index, yield and yield components of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) under water deficit stress. *EnvFemental Stresses in Crop Sciences*, *9*(1), 51-58. (in Persian). https://doi.org/10.22077/escs.2016.299
8. Bahrani, A., & Pourreza, J. (2015). Effect of some micro and macro nutrients on seed yield and oil content of rapeseed (*Brassica napus* L.). *International Journal of Chemical, EnvFemental and Biological Sciences*, *3*(1), 71-74.
9. Bayat, S., Sepehri Zare, A., Abyaneh, H., & Abdollahi, M. R. (2010). Effect of salicylic acid and paclobutrazol on

some growth characteristics and yield of maize in conditions of drought stress. *Journal of Crops Ecophysiology, 2*, 34-41. (in Persian).

10. Bybordi, A., & Mamedov, G. (2010). Evaluation of application methods efficiency of zinc and Fe for canola (*Brassica napus* L.). *Notulae Scientia Biologicae, 2*(1), 94-103. http://dx.doi.org/10.15835/nsb213531
11. Eskandari, H., Zehtab Salmasi, S., & Ghasemi-Golezani, K. (2010). Evaluation of water use efficiency and grain yield of sesame cultivars as a second crop under different irrigation regimes. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 20*(1), 39-51. (in Persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24764310.1389.20.1.4.5
12. Farahbakhsh, S., & Farahbakhsh, H. (2015). Effect of drought stress on yield and yield components of sesame cultivars under Kerman conditions (*Sesamum indicum* L.). *Iranian Journal of Field Crops Research, 12*(4), 776-783. (in Persian). https://doi.org/10.22067/gsc.v12i4.24390
13. Ghassemi, S., Ghassemi-Golezani, K., & Zehtab Salmasi, S. (2019). Changes in antioxidant enzymes activities and physiological traits of ajowan in response to water stress and hormonal application. *Scientia Horticulturae, 246*, 957-964. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.086
14. Gholinezhad, E., & Darvishzadeh, R. (2015). Effect of mycorrhizal fungi on yield and yield components of sesame (*Sesamum indicum* L.) landraces under different irrigation levels. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 25*(3), 119-135. (in Persian)
15. Hafeez, Y., Iqbal, S., Jabeen, K., Shahzad, S., Jahan, S., & Rasul, F. (2017). Effect of biochar application on seed germination and seedling growth of *Glycine max* (l.) Merr. under drought stress. *Pakistan Journal of Botany, 49*(51), 7-13.
16. Hailu, E. K., Urga, Y. D., Sori, N. A., Borona, F. R., & Tufa, K. N. (2018). Sesame yield response to deficit irrigation and water application techniques in irrigated agriculture, Ethiopia. *International Journal of Agronomy, 2018*(1), 5084056. https://doi.org/10.1155/2018/5084056
17. Heidari, M., Goleg, M., Ghorbani, H., & Baradarn Firozabad, M. (2016). Effect of drought stress and foliar application of Fe oxide nanoparticles on grain yield, ion content and photosynthetic pigments in sesame (*Sesamum indicum* L.). *Iranian Journal of Field Crop Science, 46*(4), 619-628. (in Persian). https://doi.org/10.22059/ijfcs.2015.56811
18. Heydarnejadiyan, H., Maleki, A., & Babaei, F. (2021). Effects of zinc nanofertilizer and salicylic acid on yield and yield components of fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research, 37*(1), 145-161. (in Persian). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2021.351603.2853
19. Hussain, M. A. M. M., Malik, M. A., Farooq, M., Khan, M. B., Akram, M., & Saleem, M. F. (2009). Exogenous glycinebetaine and salicylic acid application improves water relations, allometry and quality of hybrid sunflower under water deficit conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science, 195*(2), 98-109. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2008.00354.x
20. IRICA. (2021). Annual statistics. https://irica.ir/index.php
21. Jahan, M., & Amiri, M. B. (2018). Effective factors on water use efficiency in sesame, maize and common bean in response to salicylic acid under deficit irrigation condition. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 28*(1), 249-266. (in Persian)
22. Jahan, M., & Amiri, M. B. (2019). Effect of water superabsorbent levels, nutrition management and salicylic acid on soil characteristics, water use efficiency and morphological characteristics and yield of bean (*Phaseolous vulgaris* L.) in drought stress. *Journal of Crop Production, 12*(3), 1-20. (in Persian). https://doi.org/10.22069/ejcp.2019.14761.2108
23. Jahan, M., Javadi, M., Hesami, E., & Amiri, M. B. (2021). Nutritional management improved sesame performance and soil properties: A function-based study on sesame as affected by deficit irrigation, water superabsorbent, and salicylic acid. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 21*(4), 2702-2717. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00557-2
24. Kalantari, E., Armin, M., & Marvi, H. (2021). Effects of irrigation cut-off in different stages on yield and yield components of sesame cultivars. *Crop Science Research in Arid Regions, 3*(1), 151-162. (in Persian). https://doi.org/10.22034/csrar.2021.262665.1073
25. Karamian Hasan Abadi, Z., Eisvand, H. R., Daneshvar, M., & Akbarpour, O. (2021). Study the effect of drought stress and Fe oxide nanoparticle foliar application on quantitative and qualitative traits of sesame (*Sesamum indicum* L.). *EnvFemental Stresses in Crop Sciences, 14*(2), 375-386. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22077/escs.2019.2645.1687
26. Khan, M. I. R., Fatma, M., Per, T. S., Anjum, N. A., & Khan, N. A. (2015). Salicylic acid-induced abiotic stress tolerance and underlying mechanisms in plants. *Frontiers in Plant Science, 6*, 462. https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00462
27. Kazemi, K., Khajehosseini, M., Nezami, A., & Eskandari, H. (2016). The effect of seed priming on germination, yield and the quality of sesame gains under deficit irrigation. *Agricultural Crop Management, 18*(2), 373-388. (in Persian). https://doi.org/10.22059/jci.2016.56575

28. Kolupaev, Y., Yastreb, T. O., & Miroshnichenko, N. N. (2011). Influence of salicylic and succinic acids on antioxidant enzymes activity, heat resistance and productivity of *Panicum miliaceum* L. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, *7*(2), 154-163.
29. Mahmoodi Sourestani, M., Moghadam, E., & Firoozi, A. F. (2016). The effect of foliar application of iron on some biochemical and photosynthetic characteristics of holy basil (*Ocimum sanctum*). *Iranian Journal of Horticultural Science*, *47*(3), 543-552. (in Persian). https://doi.org/10.22059/ijhs.2016.59816
30. Mehrabi, Z., & Ehsanzade, P. (2011). A study on physiological attributes and grain yield of sesame cultivars under different soil moisture regimes. *Journal of Crops Improvement, 13*(2), 75-88. (in Persian). https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.83372008.1390.13.2.7.3
31. Miura, K., & Tada, Y. (2014). Regulation of water, salinity, and cold stress responses by salicylic acid. *Frontiers in Plant Science*, *5*, 4. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00004
32. Nazar, R., Iqbal, N., Syeed, S., & Khan, N. A. (2011). Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under salt stress by enhancing nitrogen and sulfur assimilation and antioxidant metabolism differentially in two mungbean cultivars. *Journal of Plant Physiology*, *168*(8), 807-815. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2010.11.001
33. Pallavi, S., Reena, N., Surabhi, J., & Sahu, R. K. (2022). Morphological responses of pea (*Pisum sativum* L. Var. Kashi Nandni) to exogenous application of salicylic acid under water deficit stress condition. *Biological Forum–An International Journal*, *14*(1), 1384-1388.
34. Pandey, A. C., Sanjay, S. S., & Yadav, R. S. (2010). Application of ZnO nanoparticles in influencing the growth rate of *Cicer arietinum*. *Journal of Experimental Nanoscience,* *5*(6), 488-497. https://doi.org/10.1080/17458081003649648
35. Rajaie, M. (2022). Improving yield, yield components and the absorption of nutrients of wheat by growth stimulants under normal irrigation and drought stress. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *20,* 147-162. (in Persian with English abstract). https://dx.doi.org/10.22067/jcesc.2022.72226.1083
36. Razmi, N., Ebadi, A., Daneshian, J., & Jahanbakhsh, S. (2017). Salicylic acid induced changes on antioxidant capacity, pigments and grain yield of soybean genotypes in water deficit condition. *Journal of Plant Interactions,* *12*(1), 457-464. https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1392623
37. Rezaeichiane, A., Khorramdel, S., Movludi, A., & Rahimi, A. (2017). Effects of nano chelated zinc and mycorrhizal fungi inoculation on some agronomic and physiological characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Filed Crops Research*, *15*(1), 168-184. (in Persian). https://doi.org/10.22067/gsc.v15i1.49876
38. Saudy, H. S., El–Samad, G. A. A., El–Temsah, M. E., & El–Gabry, Y. A. E. G. (2022). Effect of iron, zinc, and manganese nano-form mixture on the micronutrient recovery efficiency and seed yield response index of sesame genotypes. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1-11. https://doi.org/10.1007/s42729-021-00681-z
39. Shokri, S., Hooshmand, A., Golabi, M., Alemzade Ansari, N., & Struve, D. (2022). Effect of silica nanoparticles on yield of cucumber (*Cucumis sativus* L.) in Ahvaz region. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, 32*(1), 279-292. (in Persian). https://doi.org/10.22034/saps.2021.44312.2624
40. Soheili Movahhed, S., Khomari, S., Sheikhzadeh, P., & Alizadeh, B. (2020). Effects of drought stress and foliar application of boron and zinc on yield and some agronomic and morphological traits of spring type safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Journal of Agroecology, 11*(4), 1275-1291. (in Persian with English abstract) https://doi.org/10.22067/jag.v11i4.72028
41. Wei, X., Liu, K., Zhang, Y., Feng, Q., Wang, L., Zhao, Y., Li, D., Zhao, Q., Zhu, X., Zhu, X., & Li, W. (2015). Genetic discovery for oil production and quality in sesame. *Nature communications, 6*(1), 8609. https://doi.org/10.1038/ncomms9609